

# Numerische Modellierung von geführten Wellen in anisotropen Kompositen mit Anwendung in der Luft-gekoppelten Ultraschallprüfung

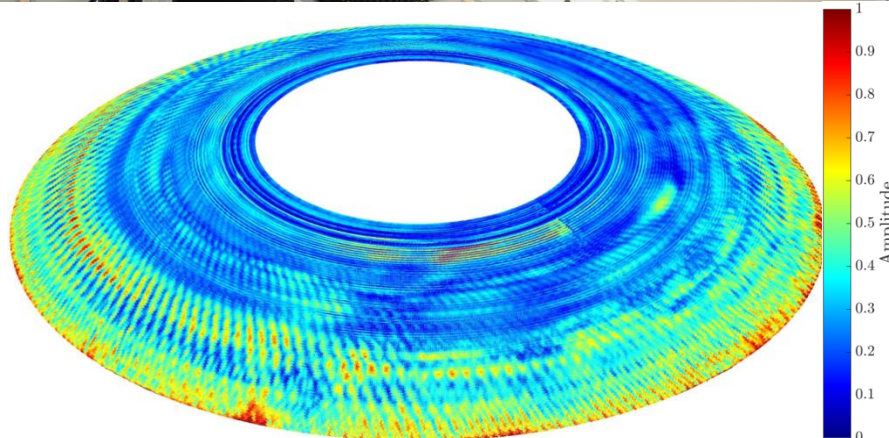
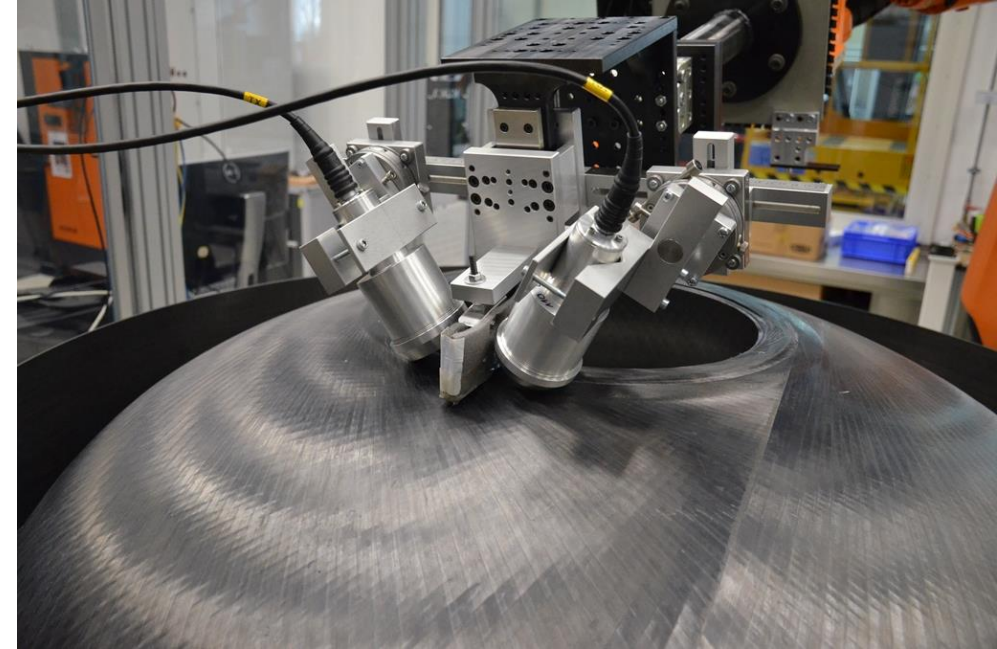
M.Sc. Armin Huber  
Augsburg, 16. Dezember 2020



Knowledge for Tomorrow



# Luft-gekoppelte Ultraschallprüfung mit Lambwellen



- Abscannen mehrfach gekrümmter Bauteile
- Lambwellenanregung durch Schrägeinschallung (200 kHz)
- Aufnahme von Messpositionen und Lambwellenamplitude
- Erzeugung dreidimensionaler Ultraschallbilder





# Anregung von Lambwellen

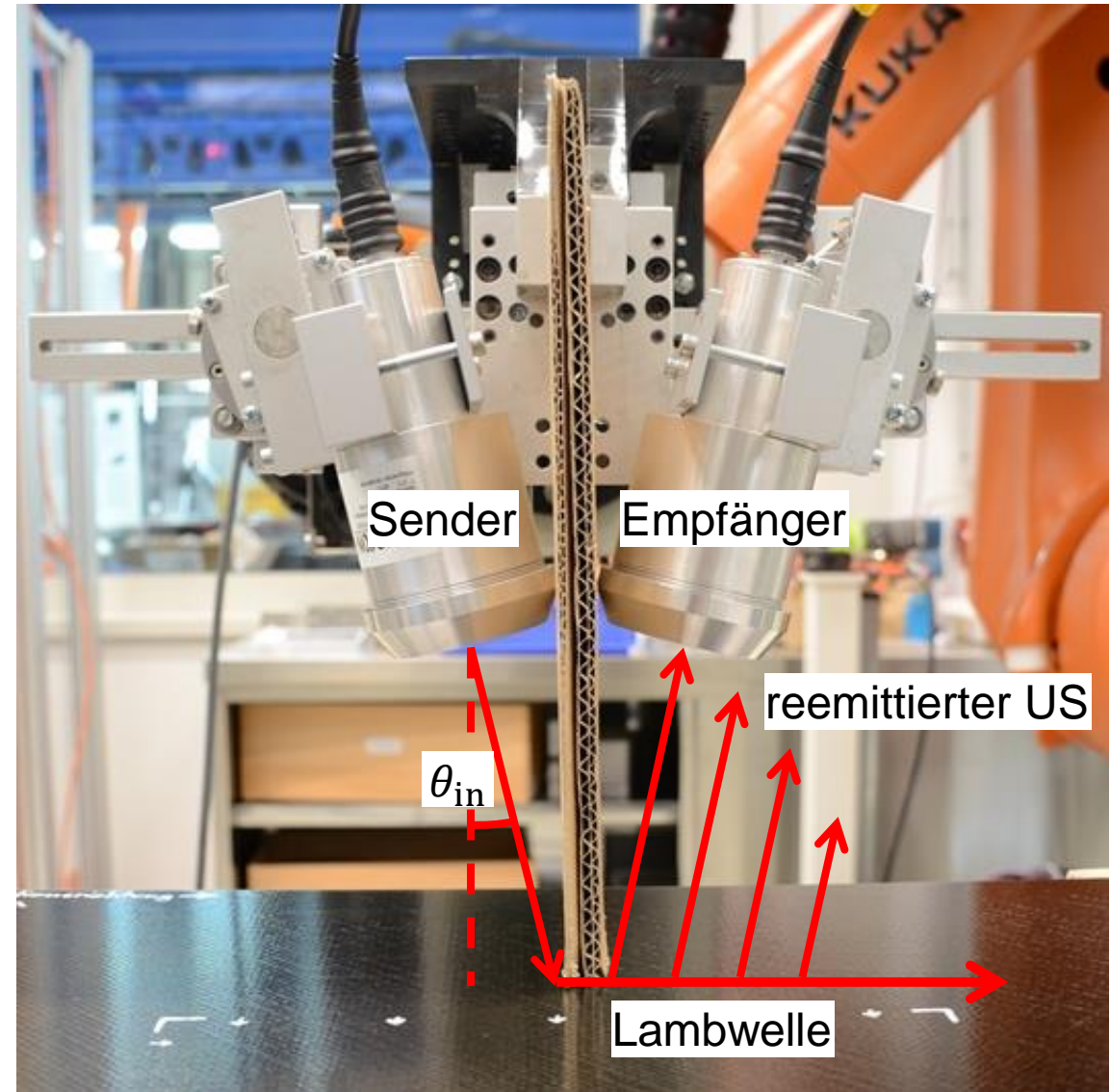
Der korrekte Einschallwinkel  
muss eingestellt werden:

$$\theta_{\text{in}} = \sin^{-1} \frac{v_{\text{Luft}}}{v_{\text{Lamb}}}$$

$v_{\text{Luft}}$ : Schallgeschwindigkeit in Luft

$v_{\text{Lamb}}$ : Phasengeschwindigkeit von  
Lambwellen hängt ab vom

- Steifigkeitstensor,
- Lagenaufbau (Dicke, Faserrichtung),
- und von der Ultraschallfrequenz (Dispersion).



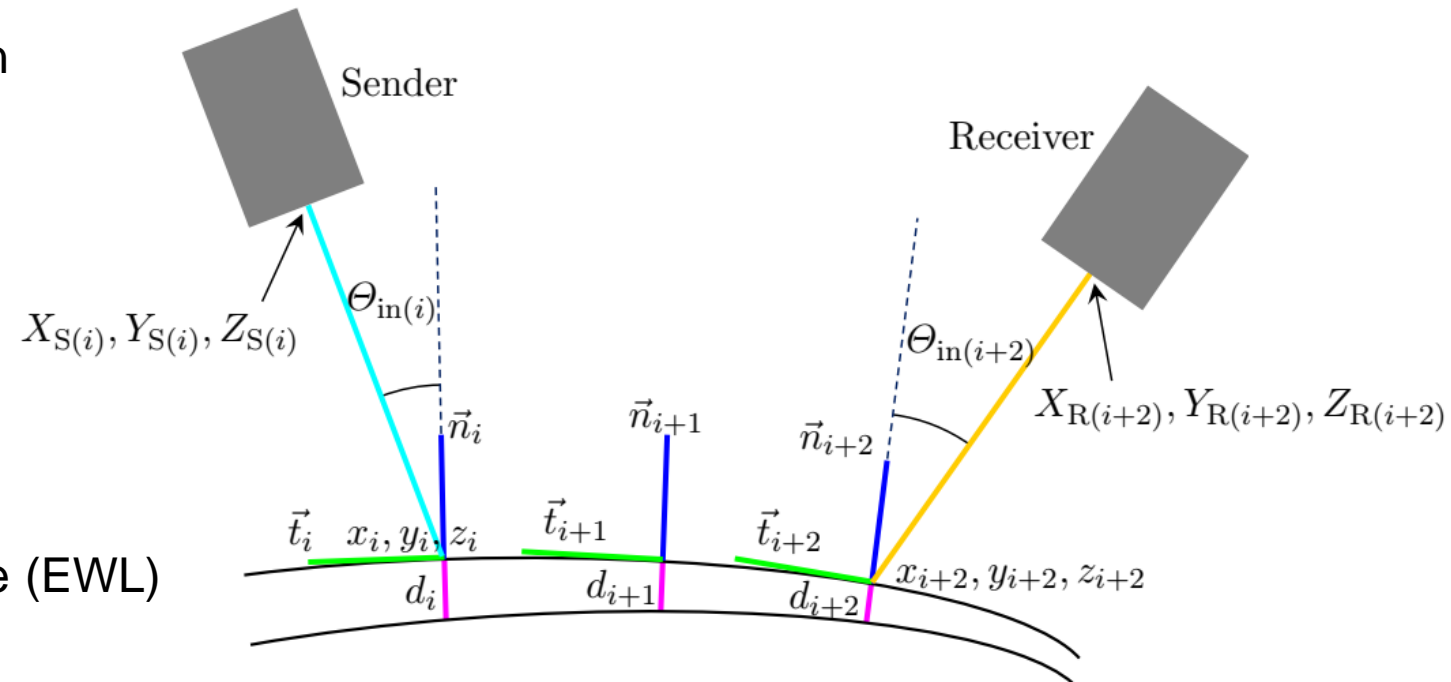
# Problemstellung

Bauteile mit variablem Lagenaufbau erfordern die Einschallwinkelanpassung während des Prüfvorgangs.

→ Manuell höchst unpraktikabel

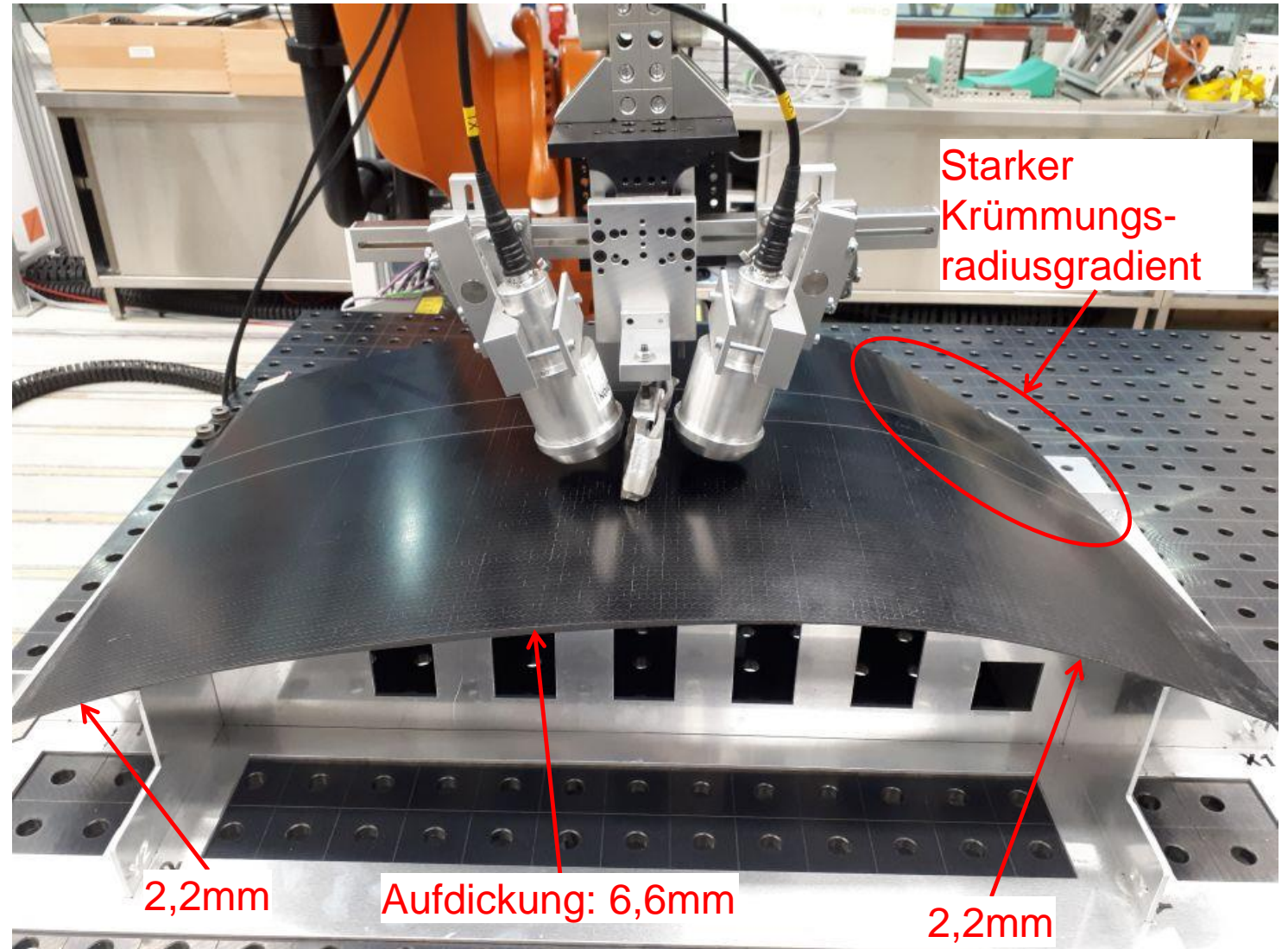
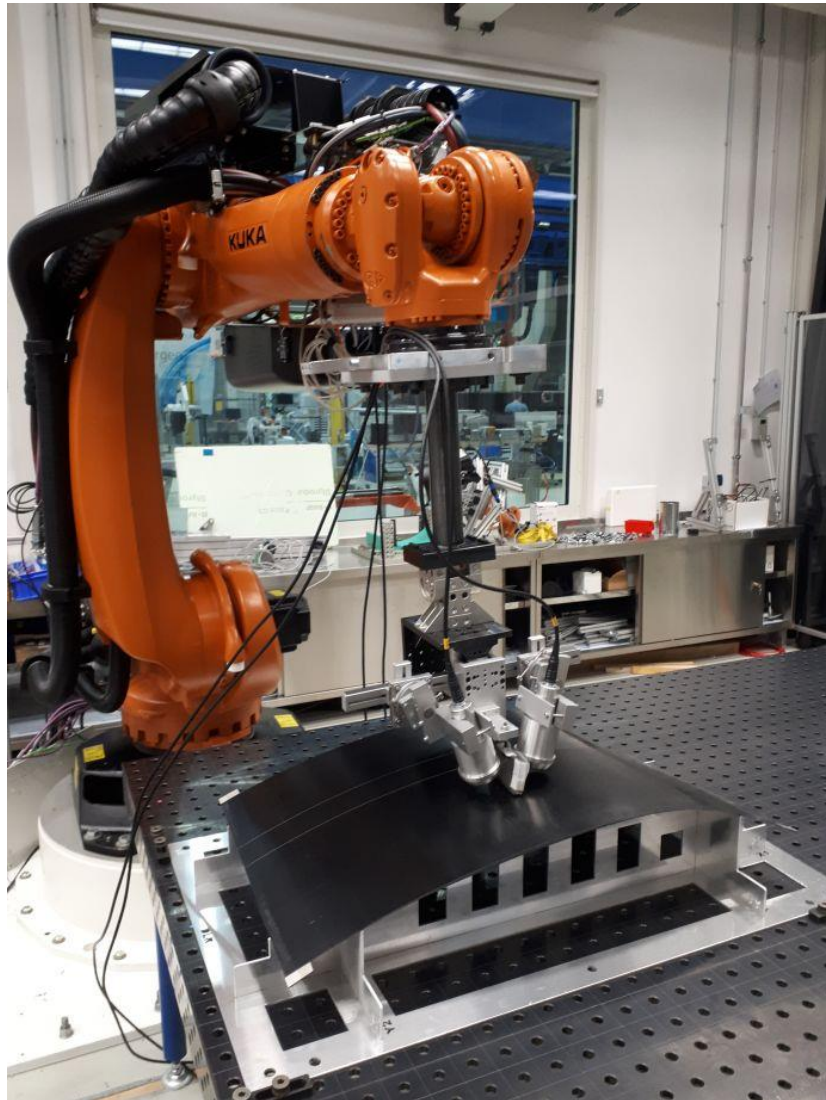
→ Lösung

- Berechnung einer Einschallwinkellandkarte (EWL)
- Entwicklung eines Adaptiven Endeffektors



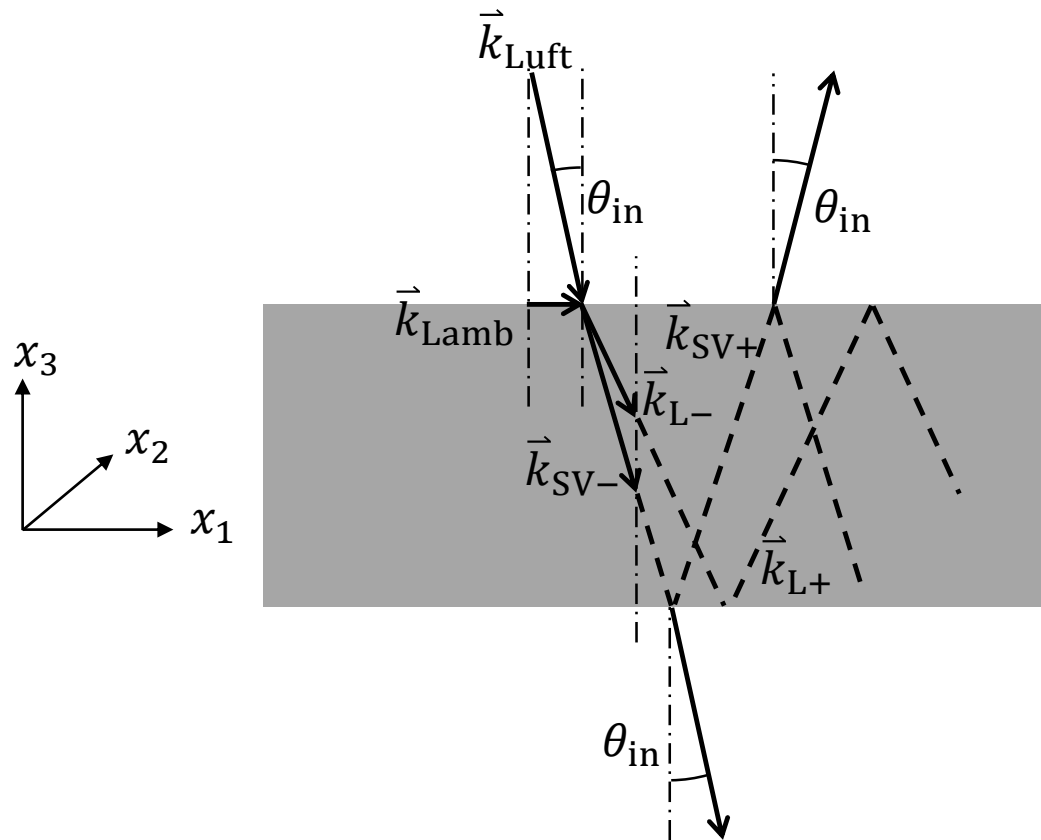


# Prüfung eines Flugzeughautfelddemonstrators mit Lambwellen



# Numerische Modellierung geführter Wellen

Lambwellen entstehen aus der konstruktiven Überlagerung von Teilwellen (engl. bulk waves)



Snellsches Brechungsgesetz:

$$\theta_{\text{in}} = \sin^{-1} \frac{v_{\text{Luft}}}{v_{\text{Lamb}}}$$

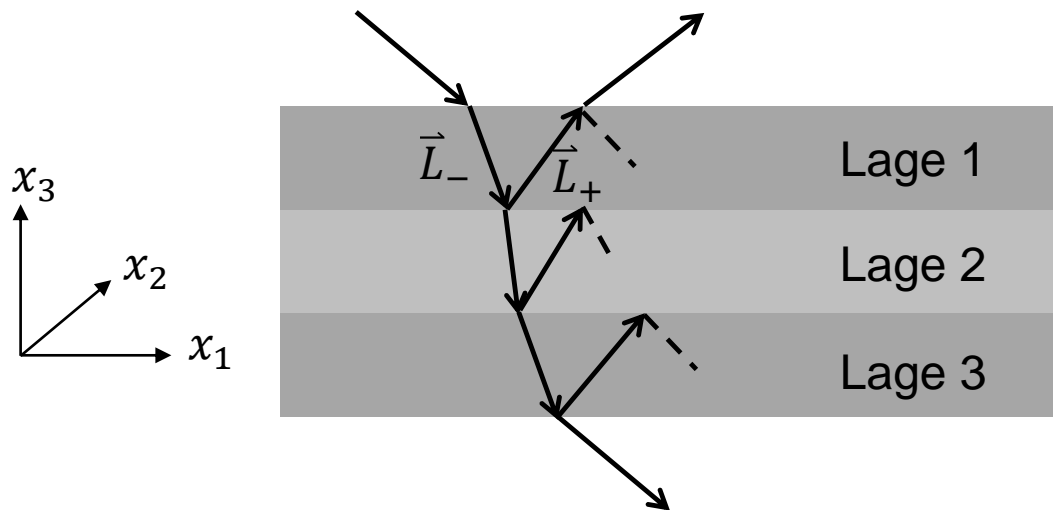
Wellenvektoren

- $\vec{k}_{\text{Lamb}}$  Lambwelle
- $\vec{k}_{\text{Luft}}$  einfallende Ultraschallwelle
- $\vec{k}_{\text{L}}$  longitudinal bulk wave
- $\vec{k}_{\text{SV}}$  shear vertical bulk wave
- $\vec{k}_{\text{SH}}$  shear horizontal bulk wave



# Stiffness Matrix Method (SMM)

S. I. Rokhlin, L. Wang, *Stable recursive algorithm for elastic wave propagation in layered anisotropic media: Stiffness matrix method*, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 112, No.3, Pt. 1, 822-834, Sep. 2002.



$$(u_1, u_2, u_3) = \sum_{q=1}^6 (1, V_q, W_q) U_{1q} e^{ik_{\text{Lamb}}(x_1 + \alpha_q x_3 - v_{\text{Lamb}} t)}$$

$$(\sigma_{33}, \sigma_{13}, \sigma_{23}) = \sum_{q=1}^6 ik_{\text{Lamb}}(D_{1q}, D_{2q}, D_{3q}) U_{1q} e^{ik_{\text{Lamb}}(x_1 + \alpha_q x_3 - v_{\text{Lamb}} t)}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{33} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{33}^* \\ \sigma_{13}^* \\ \sigma_{23}^* \end{pmatrix} = \begin{matrix} \text{Stiffness-} \\ \text{matrix} \\ \mathbf{K}(6 \times 6) \end{matrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_1^* \\ u_2^* \\ u_3^* \end{pmatrix}$$

Randbedingung:  $\sigma_{ij}, \sigma_{ij}^* = 0$

Nicht-triviale Lösung:  $\det(\mathbf{K}) = 0$

$\sigma_{ij}/u_i$  Stress/displacement an der Oberseite...  $\sigma_{ij}^*/u_i^*$  ...Unterseite der Lage bzw. Laminat





# Demonstration: Berechnung von Dispersionsdiagrammen für Lambwellen mittels DISPERSE





# Unzulänglichkeit von DISPERSE

- Berechnung von Laminaten mit maximal 60 Lagen; Raketenbooster haben aber bis zu 360 Lagen
- Manuelle Eingabe und Berechnung nur immer eines Lagenaufbaus; eine EWL hat aber um  $10^5$  Messpunkte
- Oft instabile Berechnung von Dispersionskurven in Laminaten mit vielen Lagen
- EUR  $10^4$

→ Lösung

- Entwicklung einer Software in MATLAB → Dispersion Calculator (DC)
- > 1000 Lagen können berechnet werden (dank der Stiffness Matrix Method)
- Robustere Berechnung von Dispersionskurven



# Demonstration: Berechnung von Dispersionsdiagrammen mittels Dispersion Calculator



## Das sagt der Nutzer

- **Marvin Hamstad**, Professor Emeritus for mechanical engineering at the University of Denver, Colorado, USA, on 24 November 2018:

“I did one run so far for a 84 mm thick steel plate. The calculation was much faster than the NASA program I have used for this same calculation.”

- **Michel Castaings**, Professor for physical acoustics at the Institut National Polytechnique (INP), Bordeaux, France, on 26 November 2018:

“The computation is fast (faster than the code we use in the lab) and yours seems to find all solutions quite properly. My code misses parts of the curves close to frequency cut-off.”





## Das sagt der Nutzer

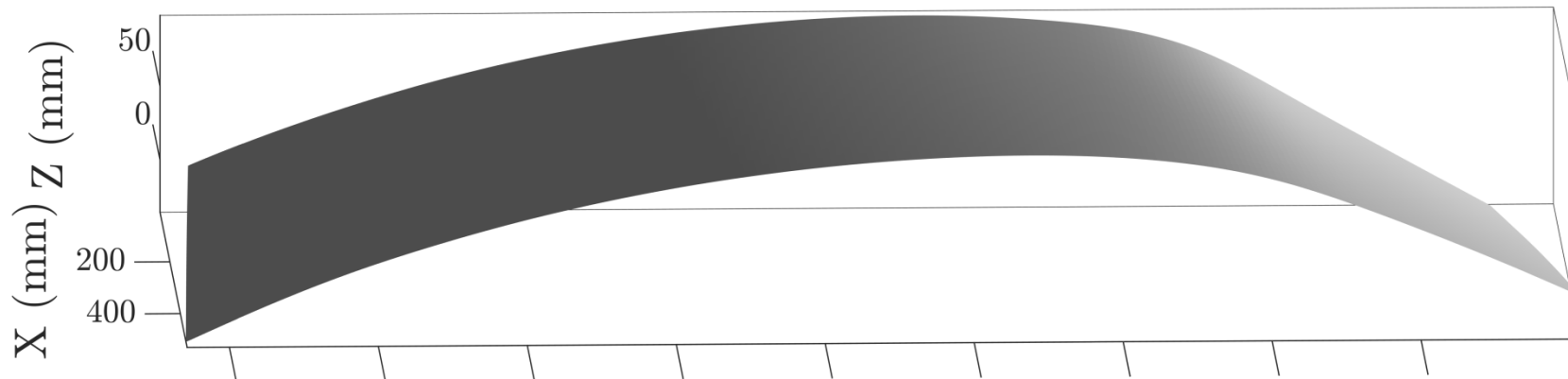
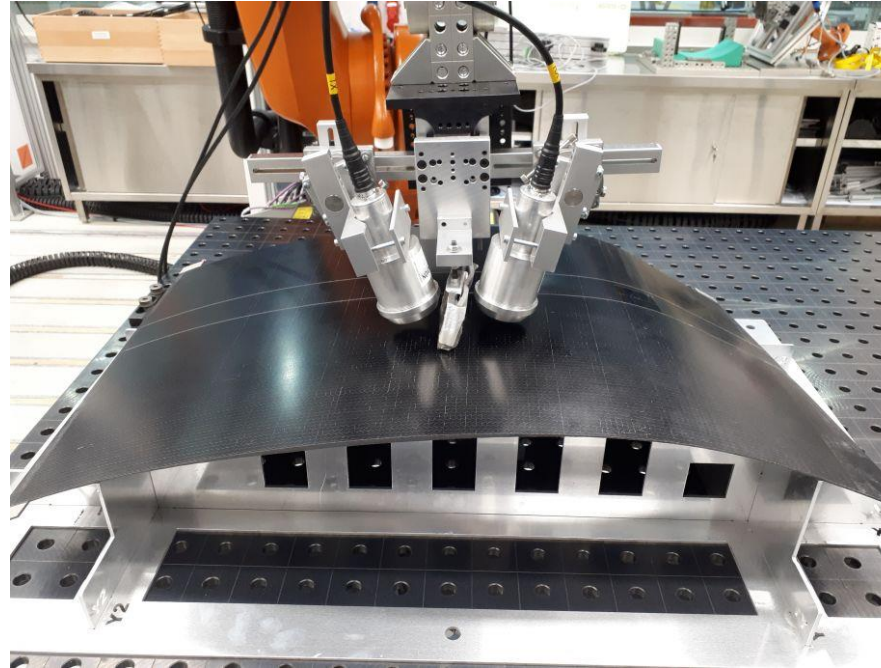
- **Tobias Roelfes**, Scientist at ROSEN Technology and Research Center, Lingen, Germany, on 15 October 2019:

„[...] Zuvor hatte ich versucht die Dispersionskurven mithilfe von DISPERSE zu berechnen. Es zeigte sich jedoch, dass DISPERSE nicht alle Moden aus irgendwelchen Gründen berechnen konnte. Der DC war hingegen in der Lage alle Moden berechnen zu können.“



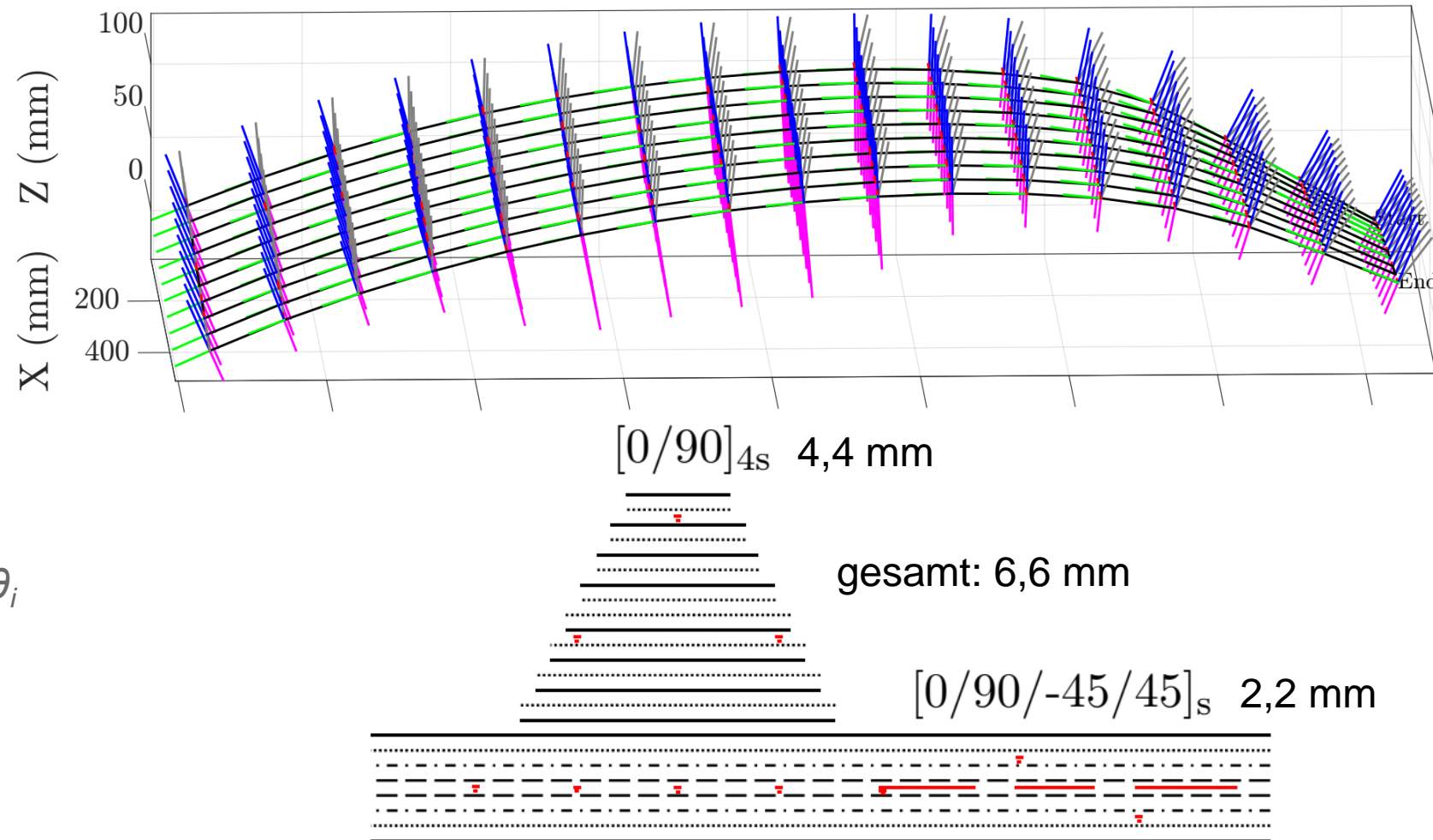
# Adaptiver Endeffektor: Softwarekette:

1. Tessellieren des CATpart und Export von Ober- und Unterseite als STL mit CATIA
2. Import und 3D-Fit der Punktwolke in MATLAB



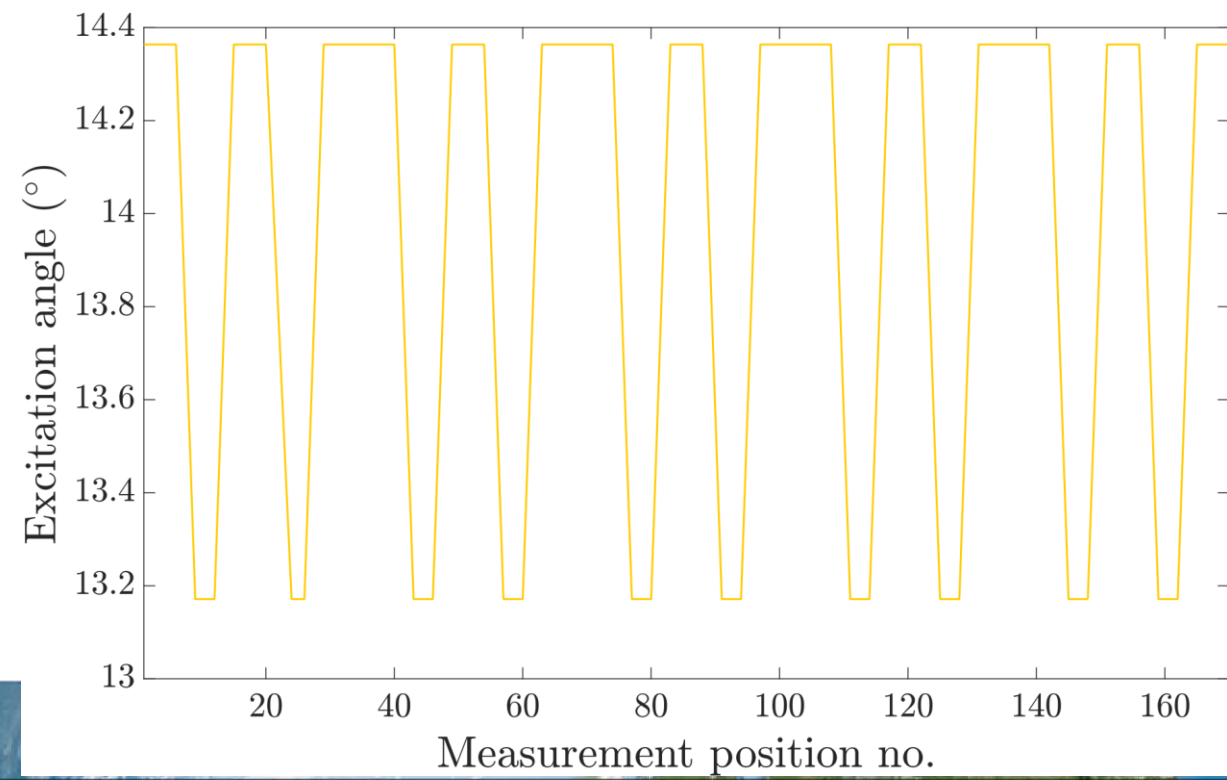
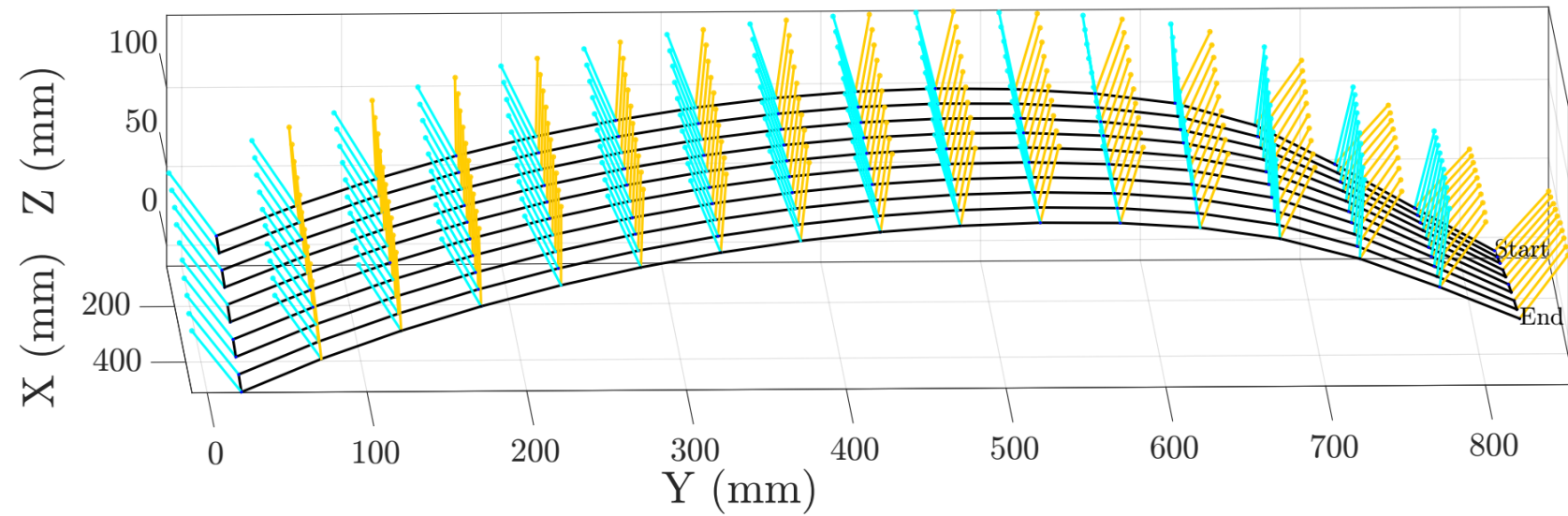
# Adaptiver Endeffektor Softwarekette:

3. Ermittlung der Koordinaten  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  durch Auswertung des Fits
4. Berechnung der Normalen  $\mathbf{n}_i$ , Binormalen  $\mathbf{b}_i$  und Tangenten  $\mathbf{t}_i$
5. Ermittlung der Dicken  $d_i$  ( $\mathbf{n}_i$  trifft Unterseite)
6. Ermittlung des Lagenaufbaus  $L_i$
7. Berechnung der Einschallwinkel  $\theta_i$  für die  $A_0$  Lambwelle bei 200 kHz





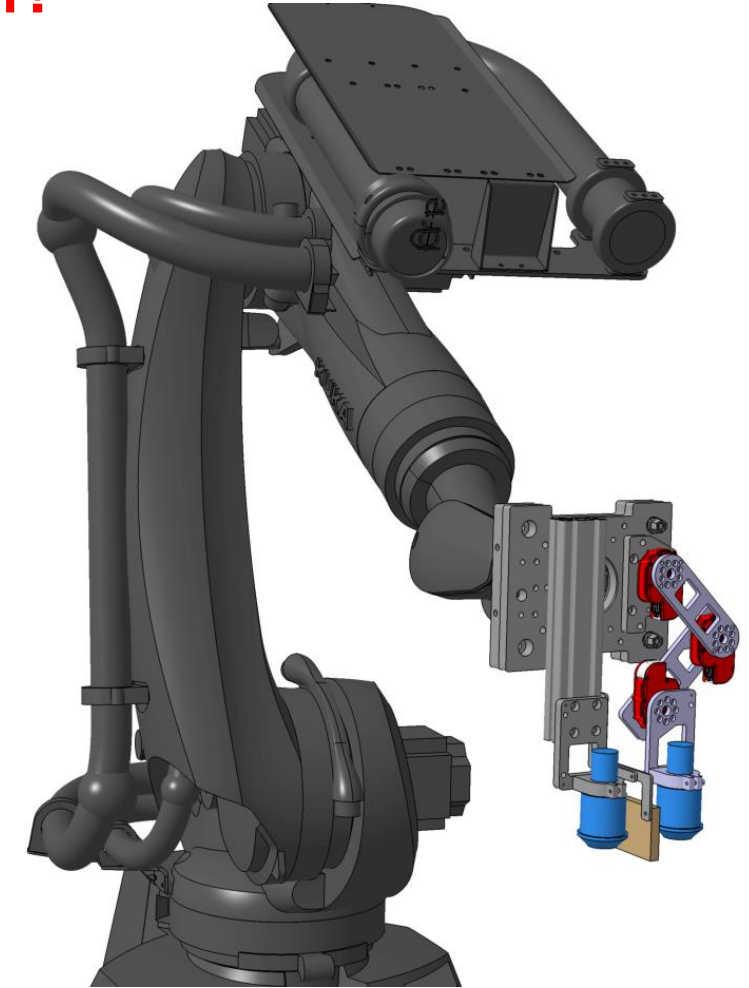
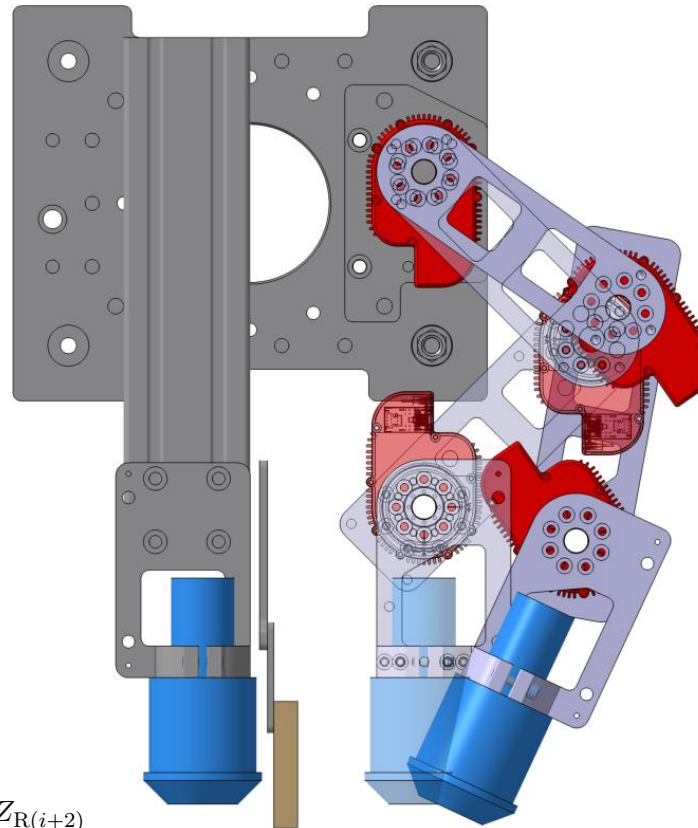
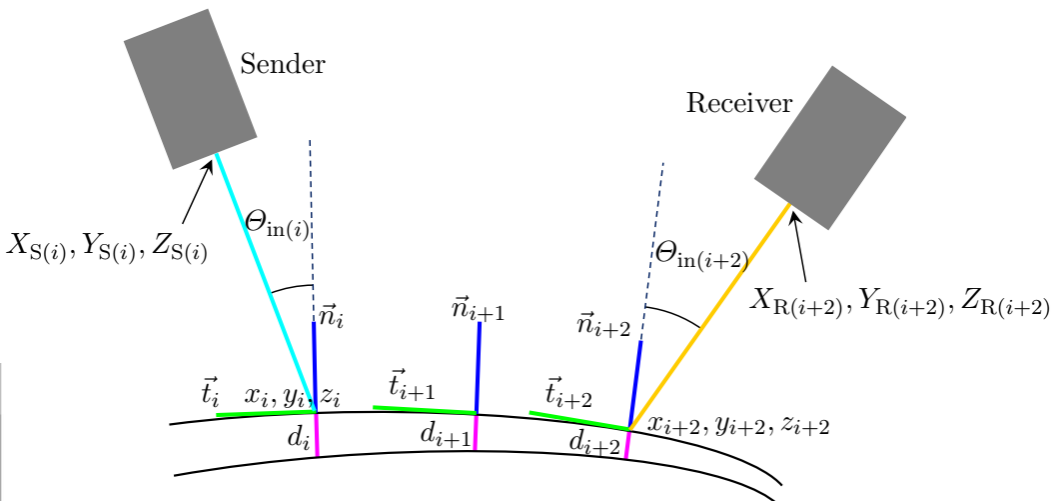
## 9. Berechnung der Posen von Sender und Empfänger → Einschallwinkellandkarte

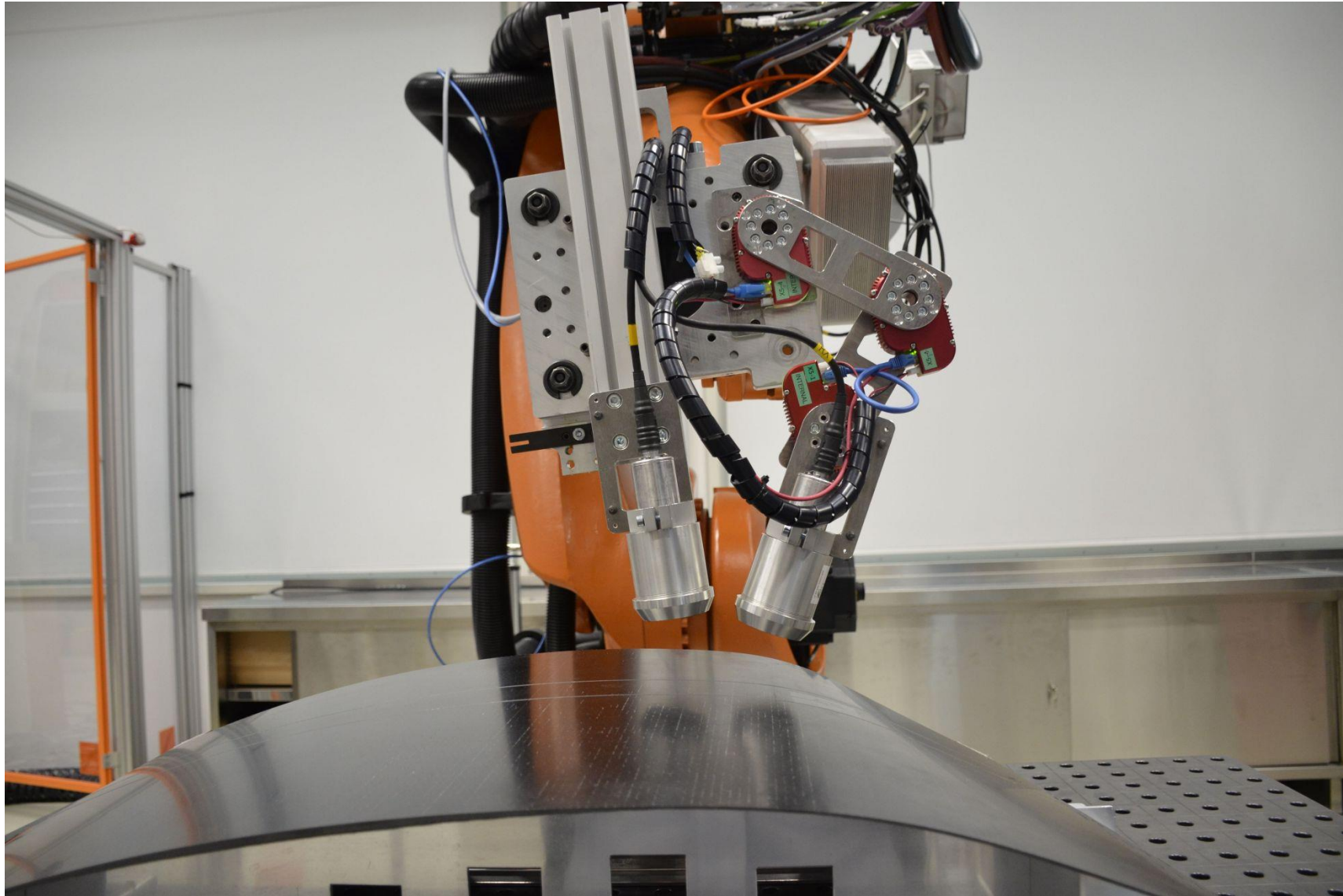


# Adaptiver Endeffektor: Mechanisches design

**Dank an Manfred Schönheits und Philipp Gänswürger!**

- Konstante Schalllaufzeiten erfordern freie Beweglichkeit der Prüfköpfe in der Rotationsebene
- Positionierung des Senders durch den KR120
- Positionierung des Empfängers durch 3 HEBI™ X-Series Aktuatoren



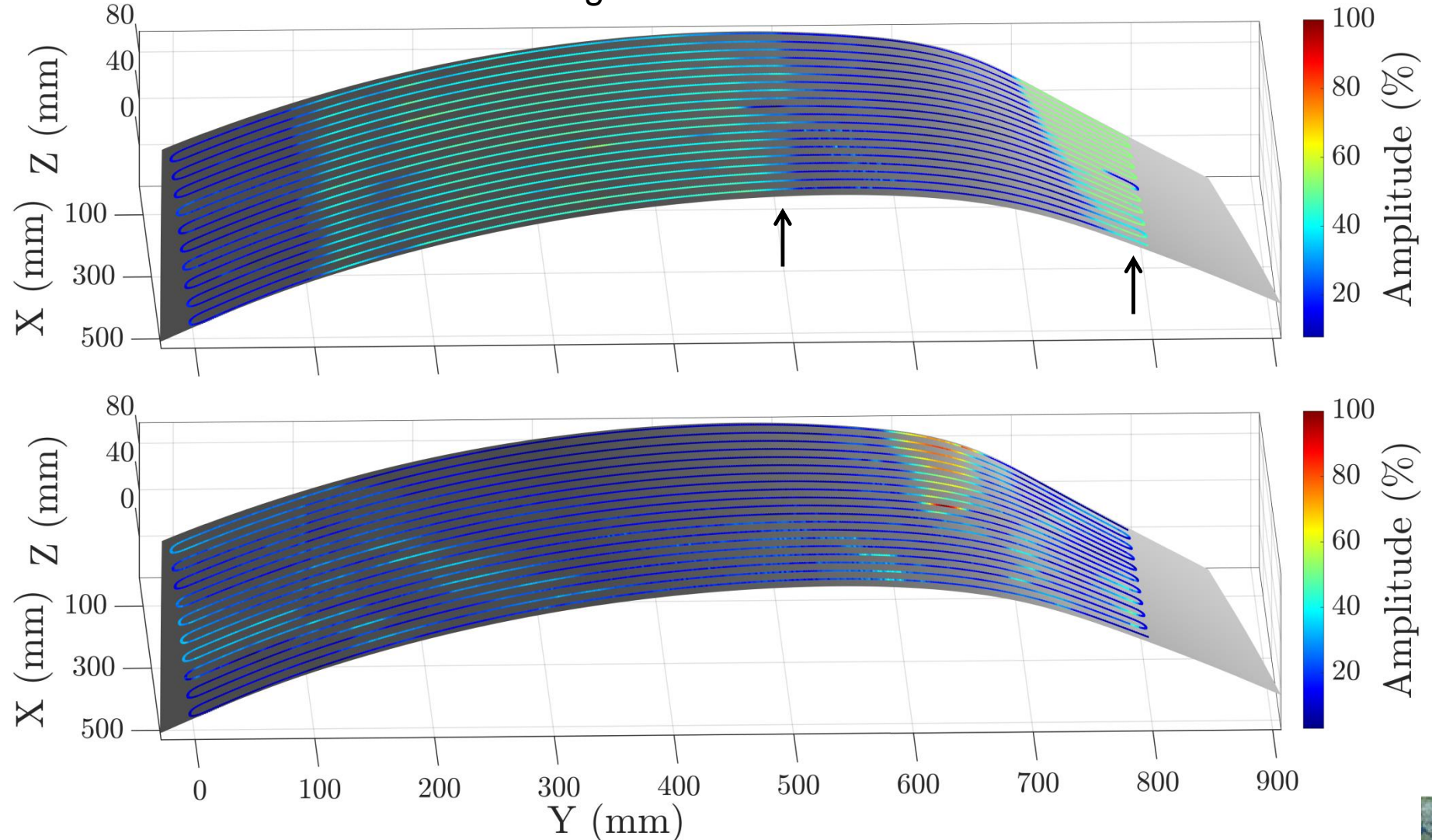




# Prüfung des Hautfelds OHNE Einschallwinkeladaption

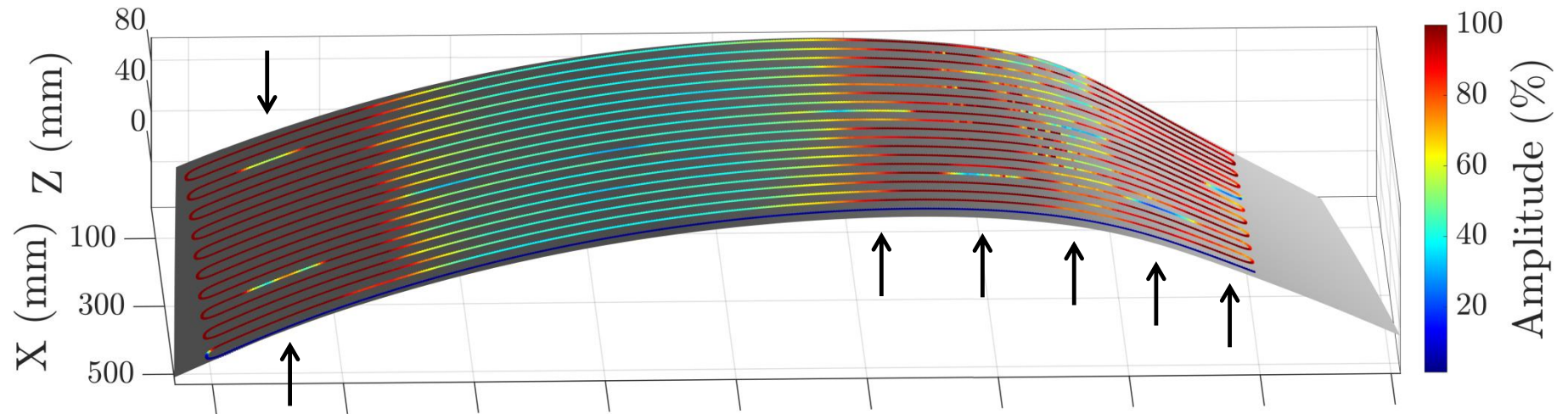
Aus zeitlichen Gründen wurde ein Bahnabstand von 25 mm eingestellt!

- $f = 200$  kHz
- Einschallwinkel auf dickem Bereich eingestellt und konstant gehalten  $\rightarrow$  Lambwellen nur im dicken und im flachen Bereich  $\rightarrow$  **2 Fehlstellen detektiert**
- Anpassung des Einschallwinkels auf stark gekrümmtem Bereich  $\rightarrow$  Lambwellen kaum irgendwo sonst angeregt  $\rightarrow$  **0 Fehlstellen detektiert**



# Prüfung des Hautfelds MIT Einschallwinkeladaption

Lambwellenanregung im ganzen Bauteil. Der Empfänger wurde in den dünnen Bereichen übersteuert → **Mindestens 7 Fehlstellen detektiert**

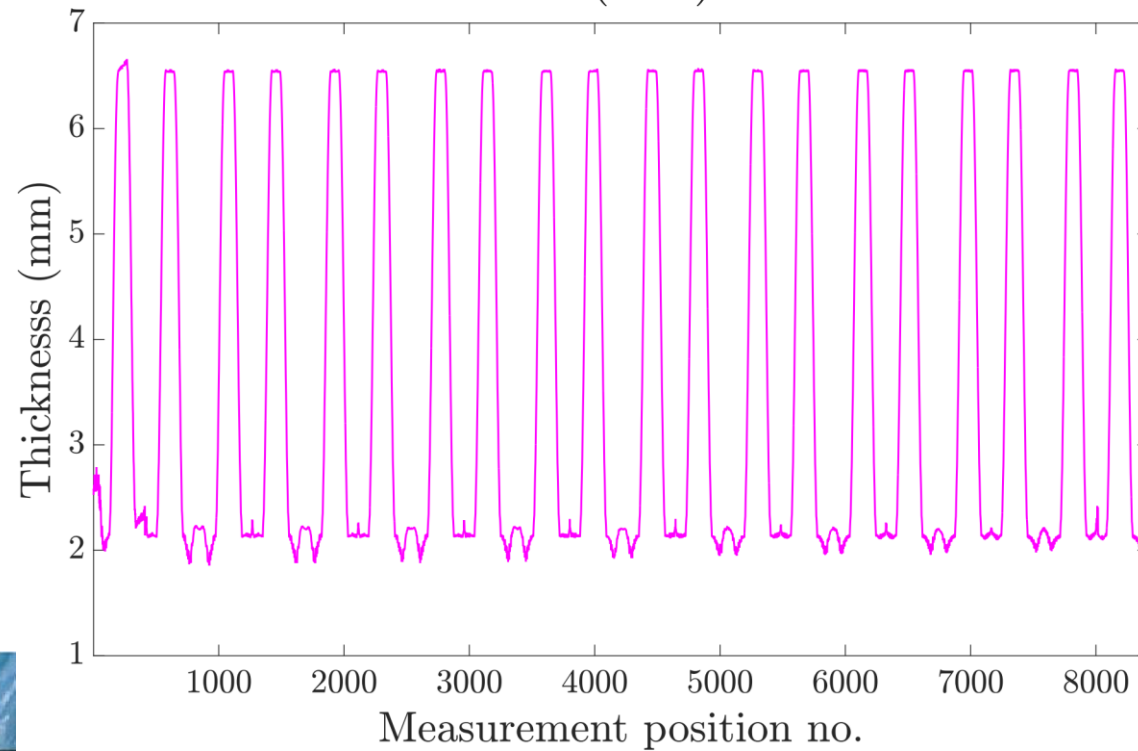
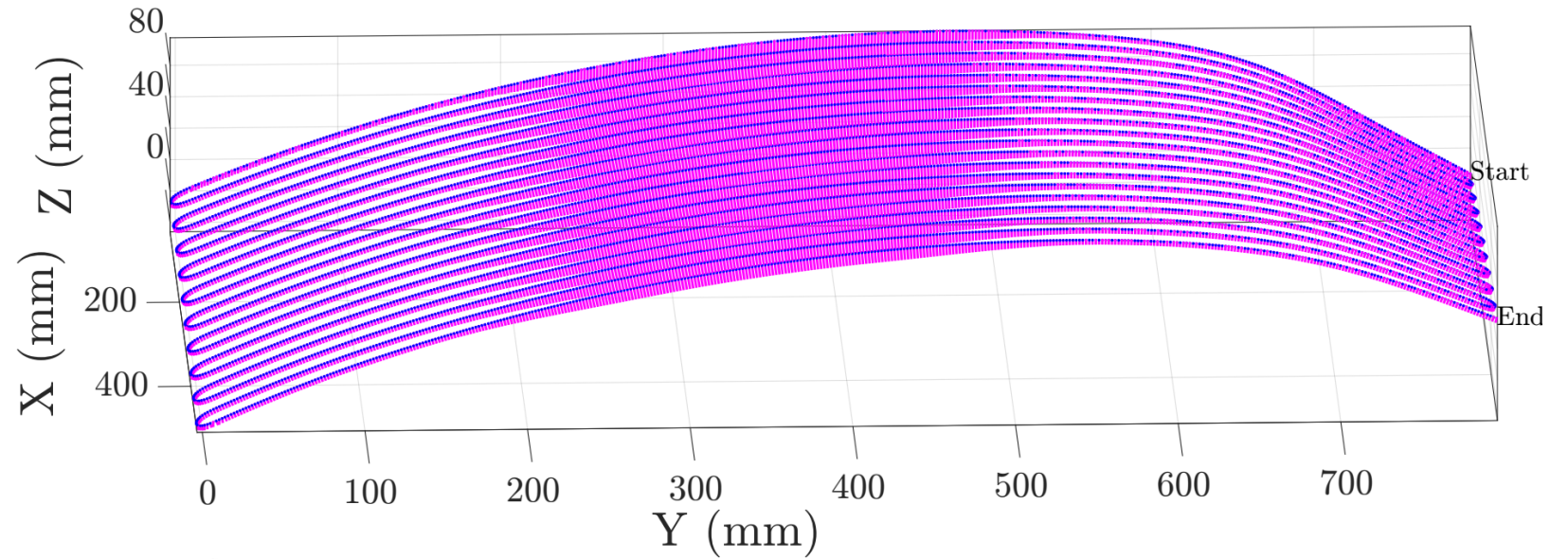


Starker Farbunterschied zwischen dünnem und dickem Bereich!



# Kompensation

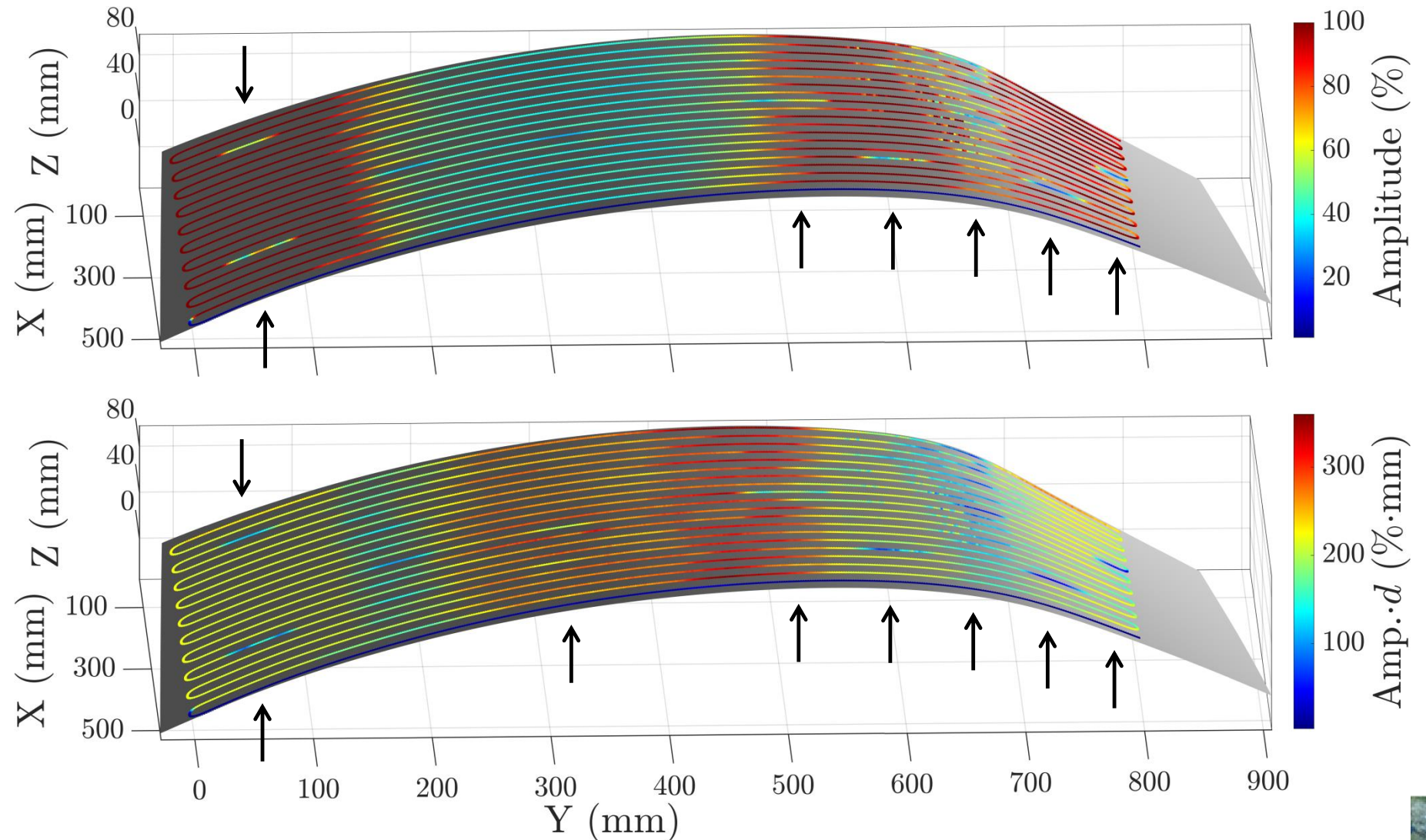
Kompensation im Postprozess  
durch Berechnung des  
Amplitude-Dicke Produkts.





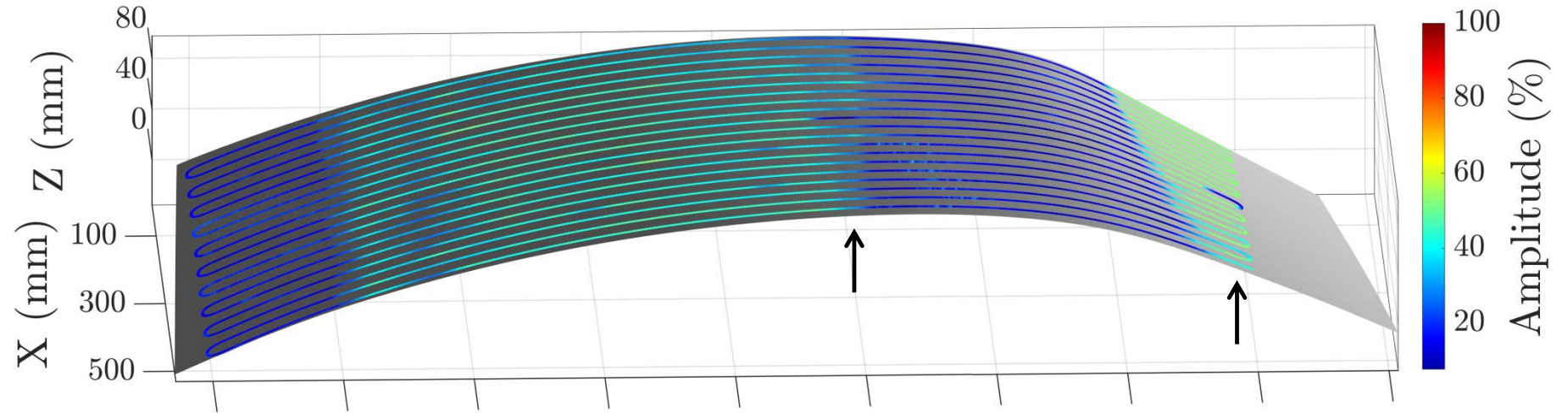
# Rohe Amplitude vs Amplitude-Dicke-Produkt

- Rohe Amplitude →  
Mindestens 7 Fehlstellen  
detektiert
- Amplitude-Dicke-Produkt  
→ homogenere  
Farbverteilung → bei  
Vermeidung der  
Übersteuerung noch  
besser zu erwarten!  
→ Mindestens 8  
Fehlstellen detektiert

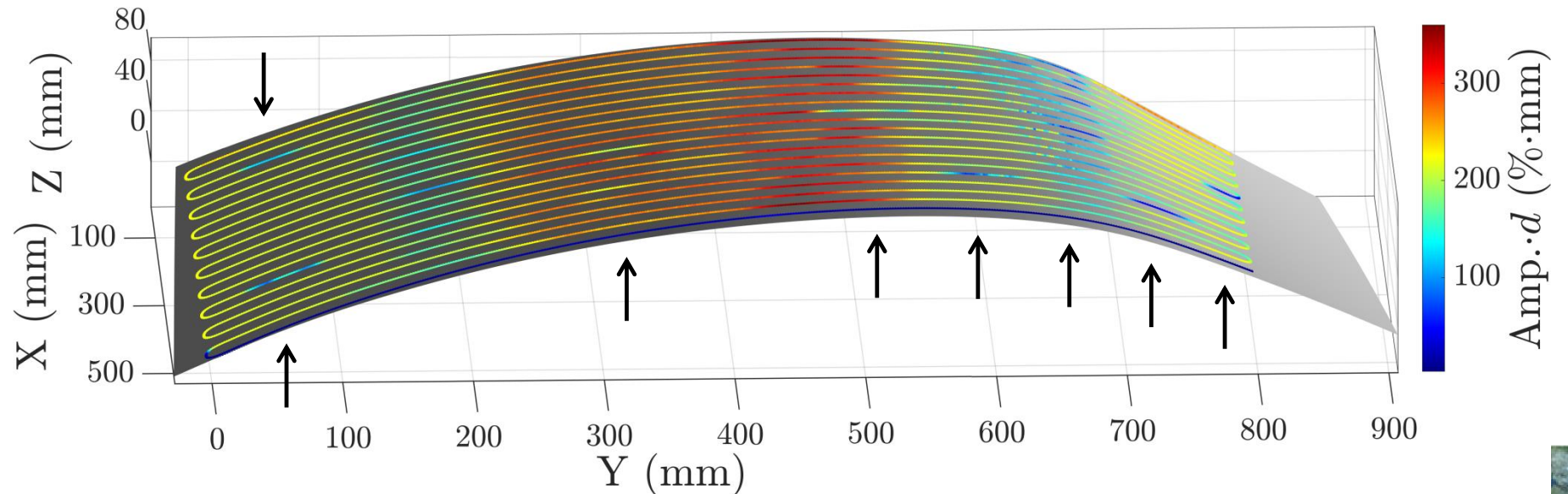


# Vergleich

- OHNE  
Einschallwinkeladaption →  
2 Fehlstellen detektiert



- MIT  
Einschallwinkeladaption →  
Mindestens 8 Fehlstellen  
detektiert (wohl einige im  
stark gekrümmten Bereich)



# Zusammenfassung

download

[https://www.dlr.de/zlp/de/desktopdefault.aspx/tabid-14332/24874\\_read-61142/#/gallery/33485](https://www.dlr.de/zlp/de/desktopdefault.aspx/tabid-14332/24874_read-61142/#/gallery/33485)

- Dispersion Calculator programmiert und veröffentlicht (aktuell DC v1.8)
  - Berechnung von viel mehr Lagen und robuster als mit DISPERSE
  - Weltweite Verbreitung v.a. in der universitären ForschungZukünftige Implementierungen:
  - Hybride aus Kompositen und isotropen Materialien (z.B. FML (GLARE))
  - Viskoelastizität → Dämpfung
  - Fluid loading → Dämpfung
- Huber and Sause, *Classification of solutions for guided waves in anisotropic composites with large numbers of layers*, J. Acoust. Soc. Am., vol. 144, p. 3236-3251, 2018.
- Adaptiver Endeffektor entwickelt und validiert
  - Optimale Lambwellenanregung in Bauteilen mit variabler Krümmung und variablem Laminataufbau
  - Verbesserte Bildgebung und Detektierbarkeit von Fehlern
  - Patentverfahren anhängig bei DPMA
- Schönheits, Huber and Gänswürger, *Air-coupled Ultrasonic Inspection with Adaptive Lamb Wave Control*, Conference Proceedings: 16<sup>th</sup> International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Prague, Czech Republic, 2019.





# Vielen Dank!

# Fragen!

Armin Huber  
Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie  
Am Technologiezentrum 4  
86159 Augsburg  
+49-821/319874 1064  
armin.huber@dlr.de

